



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

VILLE KONTOLA
PUUN KAASUTUS OSANA HAJAUTETTUA
ENERGIANTUOTANTOA

Kandidaatintyö

Kemian ja biotekniikan laitos

Tarkastaja: Seppo Syrjälä

TIIVISTELMÄ

VILLE KONTOLA: Puun kaasutus osana hajautettua energiantuotantoa
Tampereen teknillinen yliopisto
Wood gasification as part of decentralized energy production
Kandidaatintyö, 28 sivua
Elokuu 2018
Ympäristö- ja energiatekniikan koulutusohjelma
Pääaine: Energia- ja prosessitekniikka
Tarkastaja: Seppo Syrjälä

Avainsanat: puukaasu, mikrotuotanto, hajautettu energiantuotanto, CHP

Kandidaatintyön tarkoituksena oli perehtyä puukaasuun ja hajautettuun energiantuotantoon. Työssä käsiteltiin puukaasun tuottamista ja käyttöä mikrotuotannon näkökulmasta. Lisäksi tutkittiin, millä muilla tavoilla voidaan tuottaa energiaa mikrokokoluokassa.

Työssä selvisi, että puukaasu on puun termokemiallisessa hajoamisessa syntyvää kaasua, joka koostuu pääosin hiilimonoksidista ja vedystä. Puusta saadaan huomattavasti enemmän energiaa kaasutuksella kuin suoraan polttamalla. Jos puukaasusta halutaan tuottaa lämmön lisäksi myös sähköä, se on puhdistettava ennen sähköntuotantoyksikköä. Erityisesti tervan määrän vähentämiseen tulee kiinnittää huomiota. Tällä hetkellä myötävirta-kaasutin yhdessä kaasumoottorin kanssa on paras tapa tuottaa puukaasusta sähköä ja lämpöä mikrokokoluokassa. Tulevaisuudessa polttokenno tai mikroturbiini voi olla kaasumoottoria parempi vaihtoehto.

Hajautettu energiantuotanto on pienimuotoista sähkön ja lämmön yhteistuotantoa. Hajautettuun energiantuotannon muotoja ovat aurinkoenergia, pientuulivoima, lämpöpumput ja bioenergia. Suomessa bioenergia ja lämpöpumput ovat keskeisiä investointien kohteita. Puun kaasutuksen hyödyntäminen hajautetussa energiantuotannossa on toistaiseksi ollut vähäistä muualla kuin maataloilla. Tilanne voi mahdollisesti muuttua tulevaisuudessa, jos puun pienpolttoa aletaan rajoittaa lainsäädännöllä.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	PUUKAASU	2
2.1	Kaasutusprosessi	2
2.1.1	Kuivuminen	2
2.1.2	Pyrolyysi	3
2.1.3	Kaasuuntuminen ja palaminen	3
2.2	Kaasuttimet	4
2.2.1	Myötävirtakaasutin	6
2.2.2	Kaksoiskaasutin	6
3.	KAASUN EPÄPUHTAUDET JA LAATU	7
3.1	Epäpuhtaudet	7
3.2	Kaasun puhdistus	8
3.2.1	Primääriset menetelmät ja laatuun vaikuttavat tekijät	8
3.2.2	Sekundääriset menetelmät	10
4.	ENERGIANTUOTANTO PUUKAASUSTA	11
4.1	Kaasumoottori	11
4.2	Mikroturbiini	12
4.3	Stirling-moottori	13
4.4	ORC	14
4.5	Polttokennot	15
4.6	Vertailu	16
5.	HAJAUTETTU ENERGIANTUOTANTO	18
5.1	Aurinkoenergia	18
5.1.1	Aurinkolämpö	18
5.1.2	Aurinkosähkö	19
5.2	Pientuulivoima	20
5.3	Lämpöpumput	20
5.4	Bioenergia	21
6.	TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT	23
7.	YHTEENVETO	24
	LÄHTEET	25

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CHP	Combined Heat and Power, sähkön ja lämmön yhteistuotanto
CO	hiilimonoksidi
CO ₂	hiilidioksidi
CH ₄	metaani
H ₂	vety
H ₂ O	vesi
O ₂	happi
ORC	Organic Rankine Cycle, orgaaninen Rankine-kiertoprosessi
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell, kiinteäoksidipolttokenno
kW _e	sähköteho kilowatteina
kW _{th}	lämpöteho kilowatteina
MW _{th}	lämpöteho megawatteina

1. JOHDANTO

Fossiilisten polttoaineiden käyttö ei ole kestävää. Siksi energiantuotanto suuntautuu kasvavasti uusiutuviin energianlähteisiin. Tulevaisuudessa energiaa tuotetaan enemmän hajautetusti ja pienemmässä mittakaavassa. Hajautetussa energiantuotannossa käytetään pääosin paikallisia energianlähteitä, kuten biomassaa, aurinko- ja tuulienergiaa, vesivoimaa tai maaperään varastoitunutta energiaa. Puu on vanhin uusiutuva energianlähde, jota on käytetty aikojen alusta saakka. Sen käyttöä polttoaineena kuvataan hiilineutraaliksi, koska energiantuotannossa vapautuu vain sen verran hiilidioksidipäästöjä, kun mitä puu on kasvaessaan sitonut. Puun palamisprosessi on yksinkertainen ja yleisesti tunnettu, mutta puun kaasutuksen ymmärtäminen vaatii asiaan perehtymistä. Kaasutus on termokemiallinen prosessi, jossa puu muuttuu vähähappisissa olosuhteissa kaasuiksi tai kemikaaleiksi. Toisinkuin palaminen, kaasutus on lämpöä sitova prosessi. Puusta saadaan huomattavasti enemmän energiaa kaasutuksella kuin polttamalla (Dagnall et al. 2000, s. 227). Puukaasusta saadaan lämmön lisäksi sähköä esimerkiksi kaasumoottorin tai kaasuturbiinin avulla.

Tässä kandidaatintyössä käsitellään puukaasun tuottamista ja sen käyttöä, hajautettua energiantuotantoa ja puukaasun osuutta siinä. Alueellisesti työ on rajattu Suomeen ja Saksaan. Ajallisesti työssä käsitellään nykyhetkeä ja tulevaisuutta. Puun kaasutuksella on pitkä historia, mutta sitä ei käsitellä tässä työssä. Puun lisäksi kaasutuksessa voidaan käyttää muuta biomassaa, mutta tässä työssä polttoaineeksi oletetaan puu. Kaasutusprosessin aikana syntyy kaasun ohella muita hyödynnettäviä tuotteita, joita ei käsitellä. Käsiteltävä energiantuotanto rajoittuu mikrotuotantoon, joka määritellään tässä työssä sähköteholtaan alle 50 kW_e laitoiksi ja niihin sovellettaviin tekniikoihin. Suurempia tuotantolaitoksia ei tarkastella.

Työn tavoitteena on selvittää vastaus seuraaviin tutkimuskysymyksiin: mitä ovat puukaasu ja hajautettu energiantuotanto, mikä on puukaasun asema hajautetussa energiantuotannossa, mitä puukaasu sisältää, millä eri tavoilla puukaasua voidaan tuottaa, miten puukaasua voidaan käyttää energiantuotannossa, mitä eri hajautetun energiantuotannon muotoja on olemassa ja mikä on puukaasun asema hajautetussa energiantuotannossa.

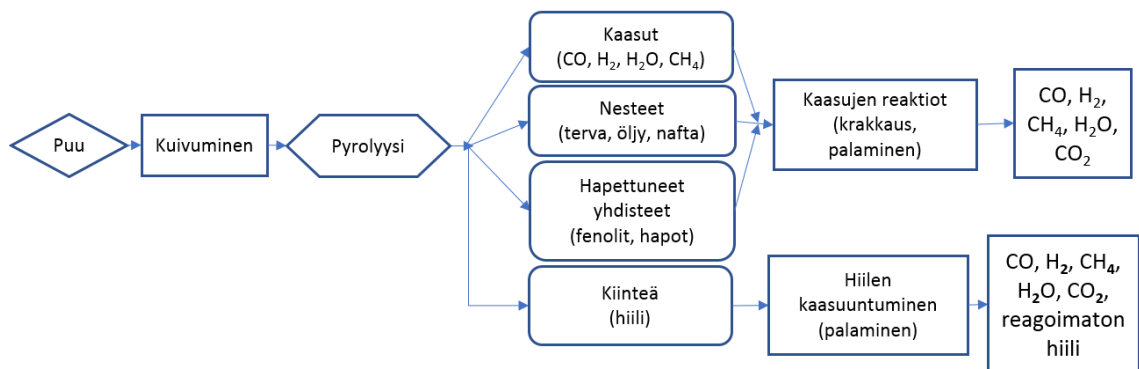
Työssä tarkastellaan aluksi kaasutusprosessia ja siihen käytettäviä tekniikoita. Kolmannessa luvussa tarkastellaan kaasussa olevia epäpuhtauksia ja laatua. Neljännessä luvussa esitellään tuotantoyksiköt, joilla puukaasusta saadaan sähköä ja lämpöä. Viidennessä luvussa tutkitaan hajautetussa tuotannossa käytettyjä energianlähteitä Suomessa ja muualla, sekä vertaillaan niitä. Kuudennessa luvussa pohditaan tulevaisuuden näkymiä erityisesti puukaasun kannalta. Seitsemännessä luvussa kootaan tutkimuksen tulokset yhteen.

2. PUUKAASU

Puukaasua syntyy puun hajotessa termokemiallisesti kaasuksi, nesteeksi ja hiileksi korkeassa lämpötilassa ja vähähappisissa olosuhteissa. Lämpötila hajoamisprosessin aikana on 300—1000 °C. (Basu 2013) Tässä luvussa käsitellään puunkaasutusprosessin vaiheet sekä kaasuttimet, joilla puukaasua voidaan tuottaa.

2.1 Kaasutusprosessi

Puun kaasutusprosessi koostuu kolmesta endotermisestä vaiheesta, jotka ovat kuivuminen, pyrolyysi ja hiilen kaasuuntuminen. Nämä vaiheet saavat energiansa kaasuttimessa tapahtuvista osittaisista eksotermisistä palamisreaktioista. Vaiheet tapahtuvat usein päällekkäin, eikä niiden välillä ole selvää rajaa. (Basu 2013, s. 201) Kuvassa 1 on esitetty kaasutusprosessin vaiheet sekä syntyvät väli- ja lopputuotteet.



Kuva 1. Kaasutusprosessin vaiheet yksinkertaistettuna (Basu 2013, s. 201).

Kaasutusprosessissa pyritään tuottamaan mahdollisimman paljon kaasuja tai hiiltä. Hiili muuttuu kaasuksi korkeassa lämpötilassa. Nesteiden ja hapettuneiden yhdisteiden määrä pyritään minimoimaan.

2.1.1 Kuivuminen

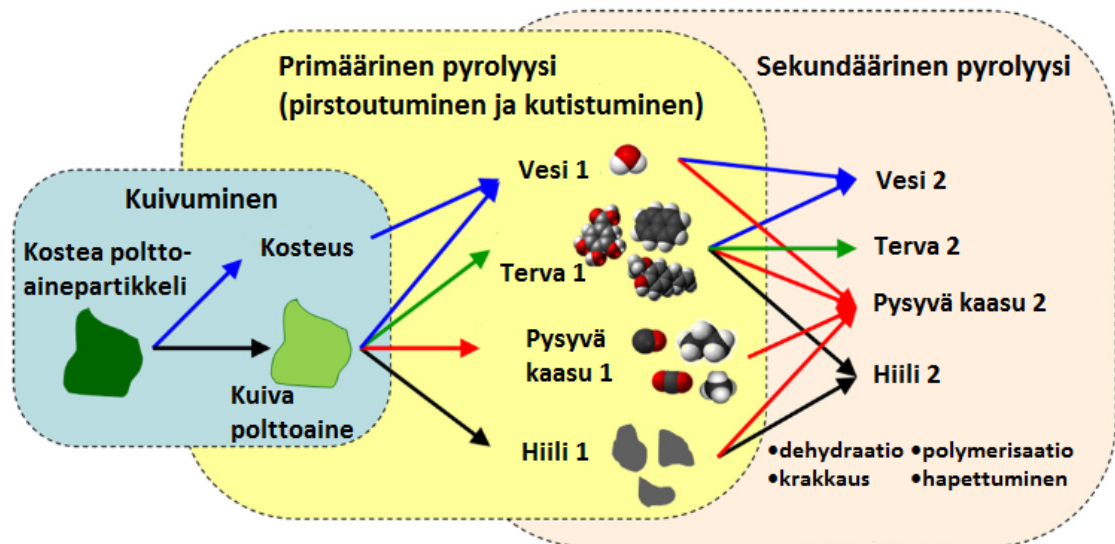
Tuoreen puun kosteus on yleensä 30—60%. Jokainen kilogramma vettä kaasuttimessa vähentää tuotettua energiaa 2260 kJ:lla, minkä takia kaasutettava puu täytyy esikuivata suurimman pintakosteuden poistamiseksi. Useimmat kaasuttimet pystyvät puukaasun tuotantoon, kun puun kosteus on 10—20%. (Basu 2013, s. 201—203)

Lopullinen kuivuminen alkaa, kun puu on syötetty kaasuttimeen. Kuivumiseen tarvittava lämpö saadaan palamisreaktioiden synnyttämästä lämmöstä. Puuhun sitoutunut vesi alkaa höyrystyä lämpötilan ylittäessä 100 °C ja jatkuu, kunnes lämpötila on 200 °C. (Basu 2013, s. 202—203)

2.1.2 Pyrolyysi

Puun pyrolyysi on suurten hiilivetymolekyylien (selluloosa, hemiselluloosa ja ligniini) termokemiallista hajoamista pienemmiksi vähähappisissa olosuhteissa. Pyrolyysi tapahtuu yleensä lämpötilassa 300—700 °C. Sen kuvaileminen on osittain hankalaa, koska siinä tapahtuu suuria fysikaalisia ja kemiallisia muodonmuutoksia. Tämän takia pyrolyysistä saatavien tuotteiden ennustus pohjautuu kokeelliseen tietoon. (Neves et al. 2011, s. 613)

Pyrolyysi tapahtuu primäärisessä ja sekundäärisessä osassa. Primäärisessä osassa polttoainepartikkelit pirstoutuvat, kutistuvat ja jakautuvat eri komponenteiksi. Sekundäärisessä osassa komponentit voivat jakautua uudelleen. Molemmat osat voivat tapahtua samanaikaisesti. (Neves et al. 2011, s. 613) Kuvassa 2 on esitetty primäärisen- ja sekundäärinen pyrolyysin aikana syntyvät tuotteet sekä sekundäärinen pyrolyysin aikana tapahtuvia reaktioita.



Kuva 2. Puupolttoainepartikkelin termokemiallinen hajoaminen vähähappisissa olosuhteissa (mukaillen Neves et al. 2011, s. 613).

Pyrolyysi voidaan jakaa karkeasti lämpenemisnopeuden mukaan nopeaan ja hitaaseen pyrolyysiin. Jotta kaasua muodostuisi mahdollisimman paljon, pyrolyysin on tapahduttava hitaasti, on käytettävä suurta lämpötilaa ja kaasun on oltava läsnä pitkään (Basu 2013, s. 160).

2.1.3 Kaasuuntuminen ja palaminen

Kaasuuntumisessa pyrolyysissä muodostuneet tuotteet palavat alistoikiometrisesti ja reagoivat edelleen hiilen ja kaasuttavan aineen kanssa (Hornung 2014, s. 140). Kaasuttava aine voi olla ilma, vesihöyry, happi tai hiilidioksidi. Useimmiten käytetään ilmaa sen helpon saatavuuden vuoksi. (Wang et al. 2008, s. 574) Lämpötila kaasuuntumisen aikana

on 800—1000 °C (Basu 2013, s. 147). Tapahtuvat reaktiot ovat sekä endotermisiä, että eksotermisiä. Reaktioissa muodostuu pääosin vetyä, hiilimonoksidia, metaania, hiilidioksidia ja vesihöyryä. Taulukossa 1 on esitetty kaasuuntumisen aikana tapahtuvat reaktiot ja niissä sitoutunut tai vapautunut energia. Negatiivinen energia tarkoittaa vapautuvaa energiaa ja positiivinen sitoutuvaa.

Taulukko 1. Kaasuuntumisessa tapahtuvat reaktiot ja niissä sitoutuva/vapautuva energia (mukaillen Basu 2013, s. 202).

Reaktiotyyppi	Yhtälö	Energia (kJ/mol)
Hiilen reaktiot	$C + CO_2 \leftrightarrow 2 CO$	172
	$C + H_2O \leftrightarrow H_2 + CO$	131
	$C + 2 H_2 \leftrightarrow CH_4$	-75
	$C + 0,5 O_2 \rightarrow CO$	-111
Palaminen	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	-394
	$CO + 0,5 O_2 \rightarrow CO_2$	-284
	$CH_4 + 2 O_2 \leftrightarrow CO_2 + 2 H_2O$	-803
	$H_2 + 0,5 O_2 \rightarrow H_2O$	-242
Vesi-kaasu	$2 CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$	-41
Metanointi	$2 CO + 2 H_2 \rightarrow CH_4 + CO_2$	-247
	$CO + 3 H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$	-206
	$CO_2 + 4 H_2 \rightarrow CH_4 + 2 H_2O$	-165
Höyryreformointi	$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3 H_2$	206
	$CH_4 + 0,5 O_2 \rightarrow CO + 2 H_2$	-36

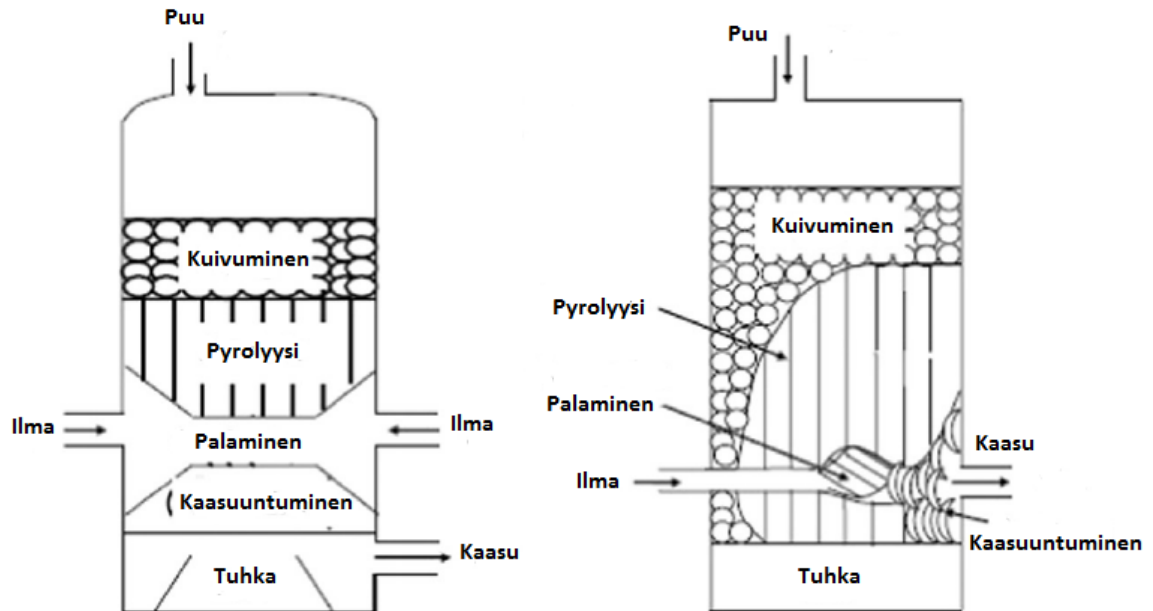
Reaktioyhtälöistä huomataan, että pyrolyysissä muodostuneen hiilen reaktiot ovat keskeisiä hiilimonoksidin muodostumisessa, mikä on yksi keskeisistä puukaasun komponenteista.

Kaasutuksessa suositetaan endotermisiä reaktioita, jotta saataisiin mahdollisimman suuri energiasisältö käyttövalmiiseen kaasuun. Tietty määrä eksotermisiä palamisreaktioita on kuitenkin tapahduttava, jotta saataisiin energiaa kuivumiseen, pyrolyysiin ja kaasuuntumiseen. (Basu 2013, s. 208)

2.2 Kaasuttimet

Kaasuttimet jaetaan kiinto-, pöly- ja leijupetikaasuttimiin. Pöly- ja leijupetikaasuttimia käytetään yli 1 MW_{th} lämpötehon tuottamiseen. Mikrotuotannossa käytetään pääosin kiintopetikaasuttimia, joiden lämpöteho on 10 kW_{th} —10 MW_{th}. (Basu 2013, s. 249—251) Tässä työssä mikrotuotanto määritellään alle 50 kW_e laitoksena, joten pöly- ja leijupetikaasuttimet jätetään käsittelemättä.

Kiintopetikaasuttimet jaetaan myötä-, vastavirta-, ja kaksoiskaasuttimiin. Pääosin mikro-tuotannossa käytettävät kaasuttimet ovat myötävirta- tai kaksoiskaasuttimia (Basu 2013, s. 251). Kuvassa 3 on esitelty myötävirta- ja kaksoiskaasuttimien periaatekuvat ja taulukossa 2 on vertailtu myötävirta- ja kaksoiskaasuttimien ominaisuuksia.



Kuva 3. Myötävirta- ja kaksoiskaasutin (mukaillen Sansaniwal et al. 2017, s. 367).

Taulukko 2. Myötävirta- ja kaksoiskaasuttimen ominaisuudet (Basu 2013, s. 252).

Puu	Myötävirtak.	Kaksoisk.
Kosteus (%)	maks. 25	10-20
Tuhkapitoisuus (%)	maks. 6	0,5-1,0
Palakoko (mm)	20-100	5-20
Kaasu		
Poistumislämpötila (°C)	700	1250
Tervapitoisuus (g/Nm ³)	0,015-3,0	0,01-0,1
Alempi lämpöarvo (MJ/Nm ³)	4,5-5,0	4,0-4,5
Hyötysuhde (%)	85-90	75-90

Taulukosta huomataan, että kaksoiskaasutin vaatii parempilaatuisempaa polttoainetta kuin myötävirtakaasutin. Lisäksi kaasun poistumislämpötila on huomattavasti korkeampi. Tervapitoisuus on kaksoiskaasuttimessa pienempi johtuen korkeammasta lämpötilasta (Basu 2013).

2.2.1 Myötävirtakaasutin

Myötävirtakaasuttimessa ilma ja polttoaine kulkevat alaspäin. Ilma tuodaan kaasuttimeen hieman kaasuttimen keskikohdan alapuolelta. Ilma reagoi puun kanssa kiihdyttäen palamista, joka ylläpitää pyrolyysiä. Vasta tämän jälkeen ilma reagoi hiilen kanssa, jolloin tapahtuu kaasuuntuminen. (Sansaniwal et al. 2017, s. 366) Sen jälkeen valmis kaasu kulkee tuhkakerroksen läpi pois kaasuttimesta kuvan 3 mukaisesti.

Myötävirtakaasuttimessa tapahtuva pyrolyysi on ns. liekehtivä pyrolyysi, jossa kuluu 99% tervasta ja pienhiukkasista. Tämän takia kaasu on hyvin puhdasta ja soveltuu hyvin pienen koon sovelluksiin. (Sansaniwal et al. 2017, s. 366) 80% kaupallisista kaasuttimista on myötävirtakaasuttimia (Hiltunen 2013).

2.2.2 Kaksoiskaasutin

Kaksoiskaasutin poikkeaa myötävirtakaasuttimesta siten, että ilma tuodaan suuttimilla suurella nopeudella sivulta ja kaasu otetaan ulos suoraan ilmantuontiaukon vastakkaiselta seinämältä. Kaasutuksen eri vaiheet eivät tapahdu suoraan ylhäältä alaspäin, vaan kehissä. (Kuva 3) Ilmaa on ylimäärä, joka aiheuttaa palamisen jopa yli 1500 °C lämpötilassa (Basu 2013, s. 258).

Kaksoiskaasutinta käytetään yleensä pienen mittakaavan yksiköissä (Basu 2013, s. 258). Hyvinä puolina kaksoiskaasuttimessa verrattuna myötävirtakaasuttimeen on lyhyt käynnistysaika, lyhyt korkeus ja nopea reagointi kuormanmuutoksiin. Huonoina puolina ovat tarkka polttoainevaatimus ja kaasun korkeapoistumislämpötila, minkä takia kaksoiskaasuttimella on vähän sovelluksia verrattuna myötävirtakaasuttimeen. (Sansaniwal et al. 2017, s. 366)

3. KAASUN EPÄPUHTAUDET JA LAATU

Kaasutuksesta peräisin oleva kaasu koostuu pääosin vesihöyrystä, hiilimonoksidista, hiilidioksidista, vedystä ja tpestä ja epäpuhtauksista. Kaasussa olevat epäpuhtaudet on poistettava ennen loppukulutusyksikköä. Kaasun koostumus riippuu kaasuttimen rakenteesta, polttoaineesta ja prosessitekijöistä. (Sansaniwal et al. 2017, s. 377)

3.1 Epäpuhtaudet

Tuotekaasussa olevia epäpuhtauksia ovat terva, pienhiukkaset sekä muut epäpuhtaudet, esimerkiksi rikin yhdisteet (Sansaniwal et al. 2017, s. 377). Epäpuhtaudet voivat aiheuttaa metallien korroosiota, ongelmia sähköntuotantoyksiköissä ja ympäristön saastumista (Anis & Zainal 2011, s. 2356). Mikrotuotannossa vaikutukset ilmanlaatuun ovat kuitenkin vähäiset.

Terva on paksua, mustaa ja suuriviskoosista nestettä, jota tiivistyy kaasuttimeen matalan lämpötilan alueille. Se koostuu 1—5 renkaisista aromaattisista ja monimutkaisista hiilivedyistä. Tervaa ei voida poistaa koskaan kokonaan, mutta sen määrää ja haitallisia vaikutuksia voidaan vähentää. (Basu 2013, s. 177)

Terva on kaasutuksen suurin ongelma, mikä aiheuttaa kaasuttimen metallien korroosiota, puhdistusyksiköiden suodattimien tukkeutumista ja ongelmia sähköntuotantoyksiköissä. Polttomoottoreissa terva aiheuttaa venttiilien jumiutumista ja kaasuturbiineissa siivekkeiden vaurioitumista. Polttomoottorille tervan yläraja on 100 mg/Nm³ ja mikroturbiinille 50 mg/Nm³. (Anis & Zainal 2011, s. 2356)

Pienhiukkaset muodostuvat tuhkasta ja hiilestä (Anis & Zainal 2011, s. 2356). Ne aiheuttavat ongelmia kaasuttimessa ja sähköntuotantoyksiköissä. Hiukkaset voivat kasaantua ja aiheuttaa korroosiota metalleihin (Wang et al. 2008, s. 574). Polttomoottoreille pienhiukkasten yläraja on 50 mg/Nm³ ja mikroturbiineille 30 mg/Nm³ (Sansaniwal et al. 2017, s.377).

Puu sisältää pieniä määriä klooria, alkalimetalleja ja rikkiä. Puun kaasuuntuessa ne vapautuvat ja reagoivat keskenään tai hapen kanssa. (Adhikari et al. 2017) Muodostuvat yhdisteet ovat ympäristölle haitallisia ja aiheuttavat metallien korroosiota. Alkalimetallit aiheuttavat ongelmia mikroturbiineissa, ja yläraja niille on 0,24 mg/Nm³. (Anis & Zainal 2011)e

3.2 Kaasun puhdistus

Sähkötuotantoyksiköt eivät pysty sellaisenaan käsittelemään tuotekaasua epäpuhtauksien vuoksi. Etenkin terva on suuri ongelma. Lisäksi ympäristölle haitallisten päästöjen määrää on vähennettävä. Kaasun puhdistusmenetelmät voidaan jakaa primäärisiin ja sekundäärisiin menetelmiin. Primääriset menetelmät käsittävät kaasutuksen aikaiset menetelmät ja sekundääriset kaasutuksen jälkeiset menetelmät (Wang et al. 2008, s. 575). Kaasun puhdistuksen tarve lisää kaasutuslaitteiston hintaa merkittävästi (Basu 2013, s. 178).

3.2.1 Primääriset menetelmät ja laatuun vaikuttavat tekijät

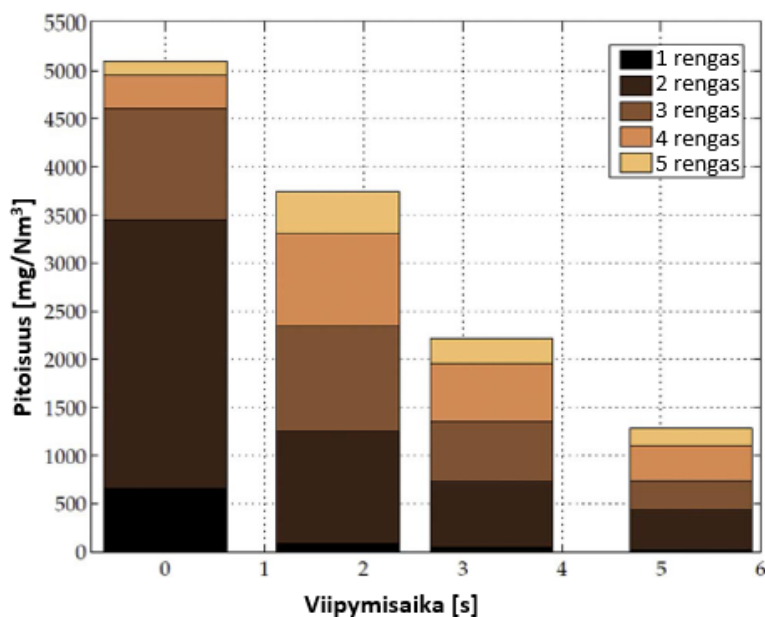
Primääriset puhdistusmenetelmät liittyvät kaasuttimen suunnitteluun ja kaasutusolosuhteisiin (Wang et al. 2008, s. 575). Niitä käytetään yleensä tervan vähentämiseen. Tervan määrään voidaan vaikuttaa lämpötilalla, kaasun viipymisajalla, ilmakertoimella ja puun koolla. (Basu 2013) Primäärisillä menetelmillä vähennetään tervan muodostumista ja edistetään sen krakkautumista.

Lämpötilalla voidaan vaikuttaa tervan muodostumiseen. Korkeaa lämpötilaa (~1200 °C) käytettäessä tervat krakkautuvat ja tervan määrä tuotekaasussa vähenee. Korkea lämpötila pienentää kaasun lämpöarvoa. (Basu 2013, s.197-198)

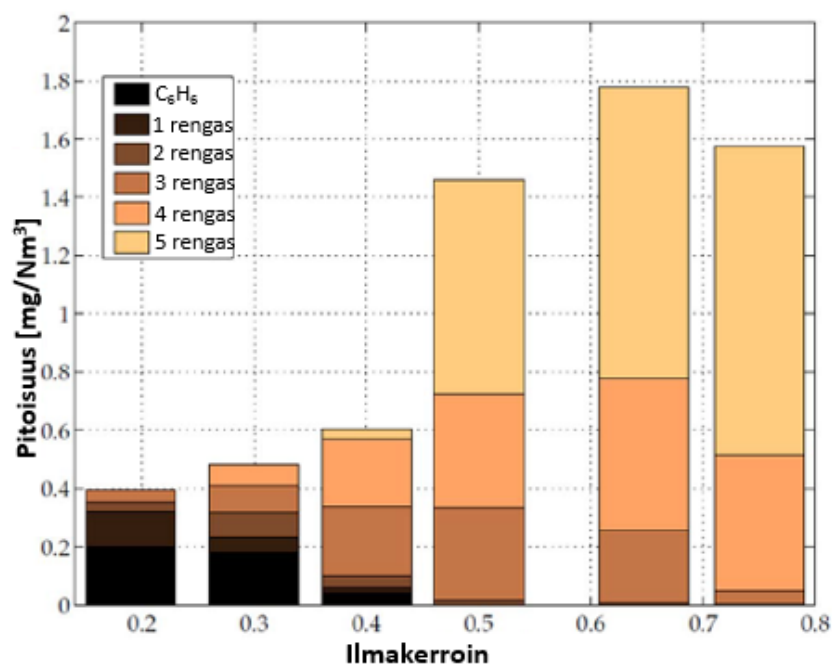
Kaasun viipymisaika muuttaa tervan muodostumista ja koostumusta. Ajan kasvattaminen lisää tervan altistumista ilmalle, joka aiheuttaa tervan hapettumisen. (Valderrama Rios et al. 2018, s. 352) Kuvassa 4 on esitelty viipymisajan vaikutus tervan määrään ja koostumukseen.

Ilmakerroin tarkoittaa kaasuuntumiseen tarvittavan hapen suhdetta täydelliseen palamiseen tarvittavaan hapen määrään. Se vaikuttaa hiilen ja tervan muodostumiseen. Sopiva ilmakertoimen arvo on yleensä 0,2—0,4. Suuri ilmakerroin aiheuttaa liiallista kaasun palamista pienentäen kaasun lämpöarvoa. (Wang et al. 2008, s. 575) Kuva 5 esittelee ilmakertoimen vaikutusta tervan määrään ja koostumukseen.

Puun koko ja muoto vaikuttavat tervan muodostumiseen. Hienojakoinen puu vastustaa vähemmän kaasun haihtumista, jolloin kaasu siirtyy ympäristöön ennen toista krakkautumista. Tällöin tervaa syntyy enemmän. (Basu 2013, s. 160)



Kuva 4. Viipymisajan vaikutus tervan määrään ja koostumukseen (mukaiillen Valderrama Rios et al. 2018, s. 354)



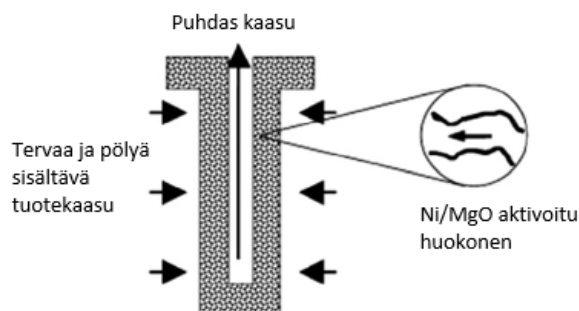
Kuva 5. Ilmakertoimen vaikutus tervan määrään ja koostumukseen (mukaiillen Valderrama Rios et al. 2018, s. 354).

Kuvasta 4 huomataan, että 1- ja 2-renkaisten tervojen määrä vähenee huomattavasti viipymisajan kasvaessa. 3—5-renkaisten tervojen osuus kasvaa suhteessa tervan kokonaismäärään. Kuvan 5 perusteella sopiva ilmakerroin tervan määrän kannalta on 0,2—0,4.

3.2.2 Sekundääriset menetelmät

Kaasutuksen jälkeiset puhdistusmenetelmät voidaan jakaa kuiva- ja märkäpuhdistusmenetelmiin. Kaasu tarvitsee jäähdyttää ennen puhdistusta. Kuivapuhdistuksessa kaasun lämpötila on 200—800 °C ja märkäpuhdistuksessa 20—60 °C. (Valderrama Rios et al. 2018, s. 353) Märkäpuhdistusmenetelmistä syntyy jätevettä, jonka puhdistaminen on hankalaa ja kallista. Mikrotuotannossa ei siten ole kannattavaa käyttää märkäpuhdistusta. (Wang et al. 2008; Le Coq & Ashenafi 2012, s. 101)

Kuivapuhdistusmenetelmiin kuuluvat muun muassa syklonit, katalyyttiset suodattimet, hiekkapetisuotimet sekä kangas- ja keraamisuodattimet. Kangassuodattimilla ja syklo-neilla kaasusta saadaan poistettua tehokkaasti pienhiukkaset ja alkalimetallit, mutta tervaa ne eivät poista tarpeeksi. Katalyyttisillä suodattimilla voidaan vähentää tervan määrää merkittävästi, ja ne ovat viime vuosina muuttuneet kustannustehokkaiksi. Kuvassa 6 on esitelty nikkeli-magnesiumoksidi-suodattimen toimintaperiaate. Hiekkapetisuotimet ovat edullisia ja poistavat hiukkaset ja tervan tehokkaasti, mutta ne tukkeutuvat usein. Keraamisuodattimet poistavat suuren osan tervasta, mutta ne ovat monimutkaisia ja kalliita. (Valderrama Rios et al. 2018) Taulukossa 3 on vertailtu kuivapuhdistusmenetelmien hyötysuhteita.



Kuva 6. Katalyyttisen suodattimen toimintaperiaate (mukaillen Anis & Zainal 2011, s. 2359).

Taulukko 3. Kuivapuhdistusmenetelmien hyötysuhteet hiukkasten ja tervojen poistossa (Adhikari et al. 2017, s. 548; Valderrama Rios et al. 2018).

Puhdistusmenetelmä	Hyötysuhde, hiukkaset (%)	Hyötysuhde, terva (%)
Sykloni	45-70	30-70
Katalyyttinen suodatin		>95
Hiekkapetisuodin	70-99	50-97
Kangassuodatin	70-95	0-50
Keraamisuodatin		75-95

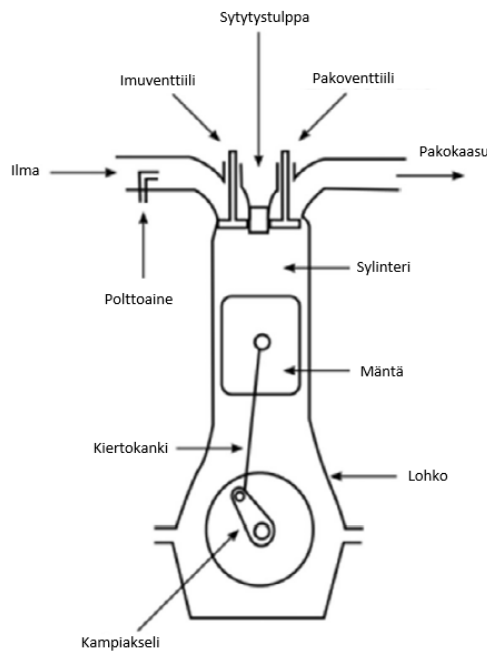
Taulukon 3 arvot eivät ole suoraan verrattavissa toisiinsa. Syklonia käytetään yleensä vain hiukkasten poistoon. Kaikkia hyötysuhteita ei ole määritetty samassa lämpötilassa. Tulokset ovat eri tutkimuksista, joten tervan määritelmät vaihtelevat.

4. ENERGIAANTUOTANTO PUUKAASUSTA

Tuotekaasusta voidaan tuottaa energiaa kaasumoottorilla, mikroturbiinilla, Stirling-moottorilla, ORC:llä ja polttokennolla. Usein tuotetaan sekä sähköä, että lämpöä. Sähkön- ja lämmön yhteistuotannolla saadaan parempi hyötysuhde. (Martinez et al. 2017, s. 262)

4.1 Kaasumoottori

Kaasumoottorit jaetaan otto- ja dieselmoottoreihin. Dieselmoottorissa ilma-polttoaineseos syttyy paineen vaikutuksesta. Ottomoottorissa ilma-polttoaineseos sytytetään kipinällä. (Martinez et al. 2017, s. 265) Kuvassa 7 on esitetty ottomoottorin komponentit ja poikkileikkaus.

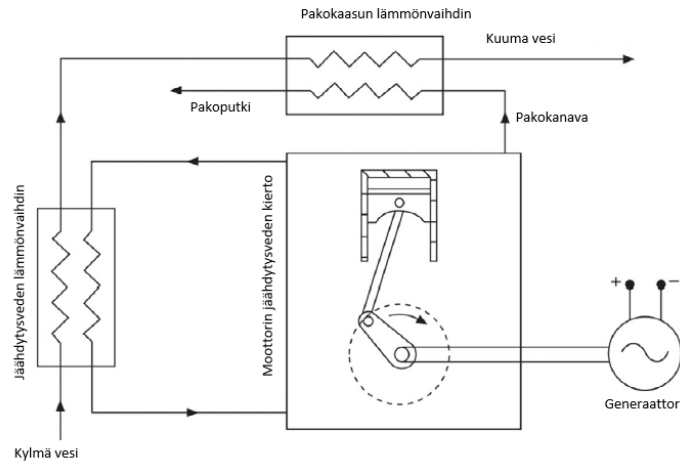


Kuva 7. Ottomoottorin komponentit ja poikkileikkaus (mukaillen Martinez et al. 2017, s. 266).

Sylinteriin imetään ilma-polttoaineseosta, jonka jälkeen mäntä puristaa sen kasaan. Tämän jälkeen sytytystulppa sytyttää seoksen. Kuuma kaasu laajenee ja mäntä liikkuu alaspäin. Kiertokanki siirtää männän pystysuoran liikkeen kampiakselin pyöriväksi liikkeeksi, jolla voidaan pyörittää generaattoria. Imuventtiilillä säädetään ilma-polttoaineseoksen sisään tuloa ja pakovalventtiilillä vastaavasti pakokaasujen poistumista.

Sylinteri lämpenee kierron jatkuessa huomattavasti, joten se tarvitsee jäähdytystä. Jäähdytysveden lämpötila on 85—95 °C. Pakokaasujen lämpötila vaihtelee 300—600 asteen

välillä. Lämmönvaihtimia käyttämällä saadaan lämpöenergia talteen. (Martinez et al. 2017, s. 266) Kuvassa 8 on esitetty tyypillinen kaasumootorin CHP-järjestelmä.

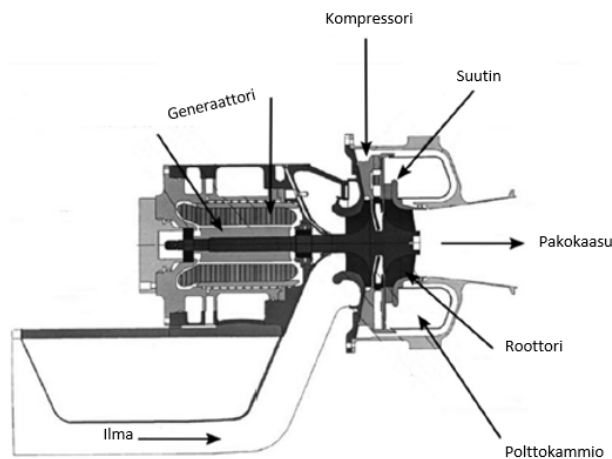


Kuva 8. Kaasumootorin CHP-järjestelmä (mukaillen Martinez et al. 2017, s. 267).

Hyötysuhde vaihtelee hieman moottorikohtaisesti. Yleensä sähköntuotannon hyötysuhde on yleensä 27—30% ja lämmöntuotannon 60—80%. Yhteistuotannon hyötysuhde voi olla jopa yli 90%. (Mikalsen 2011)

4.2 Mikroturbiini

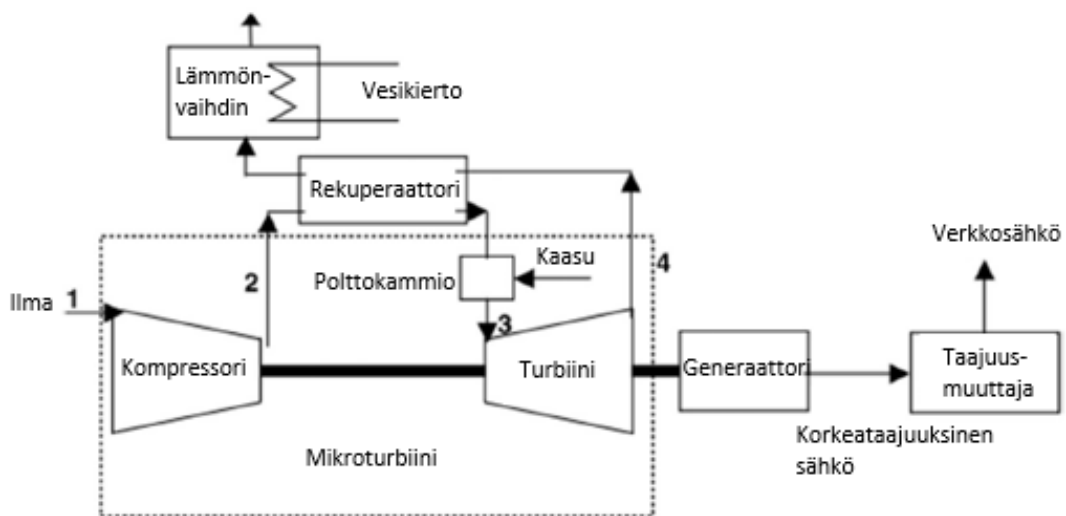
Mikroturbiinit ovat pieniä kaasuturbiineja. Ne toimivat samalla periaatteella kuin suuremmat teollisen mittakaavan turbiinit. Yleensä kaasuturbiinit ovat yksiakselisia, jolloin kompressori, turbiini ja generaattori ovat samalla akselilla. (Backman & Kaikko 2011, s. 147—148) Kuvassa 9 on mikroturbiinin poikkileikkaus.



Kuva 9. Mikroturbiinin poikkileikkaus (mukaillen Martinez et al. 2017, s. 268).

Ilma tuodaan kompressoriin, jossa sen paine kasvaa. Tämän jälkeen ilma viedään polttokammioon, jossa ilma sekoitetaan polttoaineen kanssa ja seos palaa. Kuuma kaasu laajenee ja pyörittää roottoria. Generaattori pyörii ja tuottaa sähköä enemmän kuin kompressorin kuluttaa. Saatu sähkö on hyvin korkeataajuisia johtuen turbiinin suuresta pyörimisnopeudesta (jopa yli 90 000 rpm). Taajuusmuuttajan avulla sähkö voidaan muuttaa verkon taajuuteen. (Backman & Kaikko 2011)

Pakokaasun lämpötila turbiinista poistuessaa on 900—950 °C. Rekuperaattorilla voidaan siirtää lämpöä pakokaasuista palamisilmaan, mikä parantaa hyötysuhdetta. Rekuperaattorin jälkeen pakokaasuista saadaan lämpöenergiaa talteen lämmönvaihtimella. (Backman & Kaikko 2011) Kuvassa 10 on esitetty rekuperaattorilla varustettu mikroturbiinijärjestelmä.

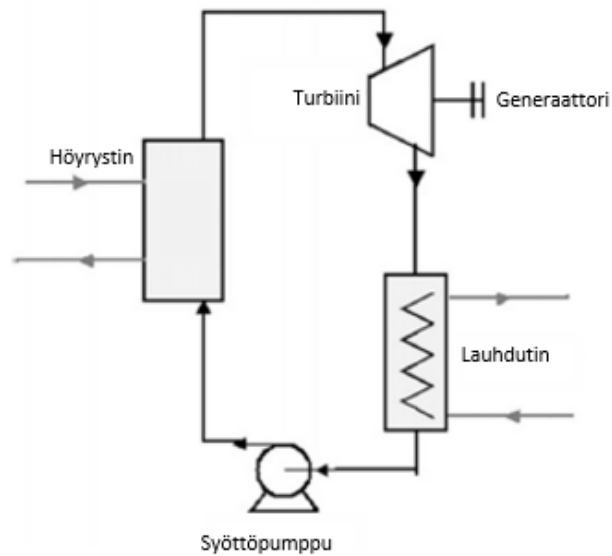


Kuva 10. Rekuperaattorilla varustettu mikroturbiinijärjestelmä (mukaillen Martinez et al. 2017, s. 268).

Mikroturbiinin hyötysuhde on huonompi kuin kaasumoottorin. Lisäksi sen hyötysuhde heikkenee osakuormilla. (Martinez et al. 2017, s. 268) Hollantilaisen MTT:n mikroturbiini tuottaa 3,2 kW sähkötehoa 16% hyötysuhteella (MTT Micro Turbine Technology).

4.3 Stirling-moottori

Stirling-moottori on ulkoinen polttomoottori, jossa käytetään työkaasua, esimerkiksi heliumia. Työkaasu on suljettu moottorin sisään. Moottori koostuu sylinteristä, regeneraattorista, männästä ja apumännästä. Sylinterin toista päätä lämmitetään ja toista jäähdytetään. Työkaasuun syntyy paineenvaihteluja, jotka saavat aikaan männän liikkeen. Regeneraattorilla työkaasua siirretään kylmän ja kuuman puolen välillä. (Harrison & On 2011, s. 180) Kuvassa 11 on esitetty Stirling-moottorin periaatekuva.



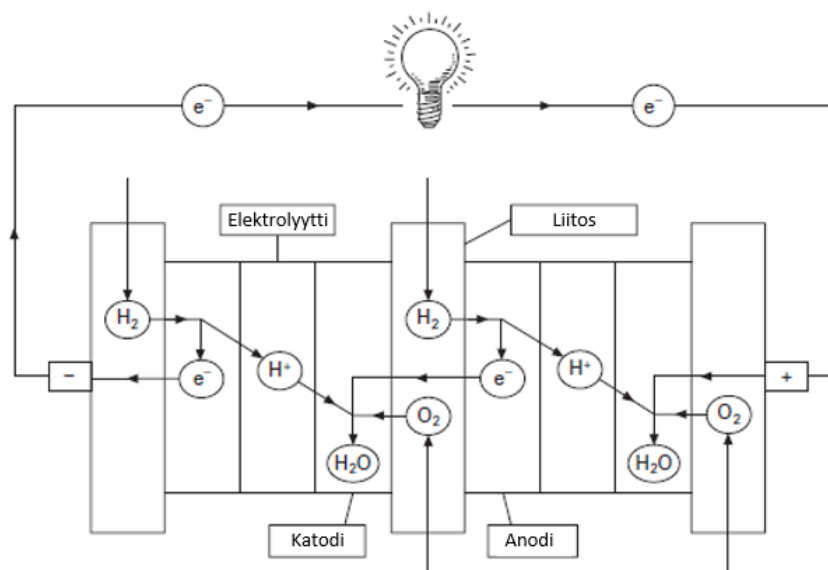
Kuva 12. ORC-prosessikaavio (mukaillen Martinez et al. 2017, s. 270).

Kaupallisia sovelluksia ei ole alle 25 kW_e kokoluokassa, mitkä hyödyntäisivät ORC-prosessia ja puuta. Syynä tähän ovat hyvin korkeat investointikustannukset. Sähköntuotannon hyötysuhde alle 25 kW_e kokoluokassa olisi 10—20% ja yhteistuotannon 70—85%. (Algieri & Morrone 2014)

4.5 Polttokennot

Polttokennot ovat sähkökemiallisia laitteita, jotka muuttavat polttoaineen kemiallisen energian sähköksi ja lämmöksi ilman polttoprosessia. Ne ovat helposti muokattavissa halutun tehon mukaan. Polttokennoja on useaa eri tyyppiä, joista SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) eli kiinteäoksidipolttokenno on sopiva puukaasulle. (Brett et al. 2011)

Kaikki polttokennotyypit toimivat samalla periaatteella. Yksittäiset kennot koostuvat anodista, elektrolyytistä ja katodista, jotka ovat kytkettynä sarjaan. Bipolaarilevyillä kuljetetaan polttoaine ja hapetin yksittäisiin kennoihin ja kytketään kennot yhteen. Sisään tulevan vedyn elektronit siirretään anodille, jossa muodostuu ioneja. Ionit kulkevat elektrolyytin läpi katodille, jossa ne yhdistyvät hapen kanssa. Elektronit tuottavat sähkövirran ulkoisen piirin kautta ja tekevät työtä. (Brett et al. 2011, s. 234) Polttokennon toiminta on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. Polttokennon toiminta (mukaillen Brett et al. 2011, s. 234).

Polttokennoja on kehitetty viimeiset 30—50 vuotta, mutta sovellukset ovat vielä esikau-pallisia. Investointikustannukset polttokennoihin ovat kaikista tuotantomenetelmistä suu-rimmat, joka rajoittaa leviämistä markkinoille. Tulevaisuudessa polttokennoja tuotetaan mahdollisesti massatuotantona, joka tarkoittaisi kustannusten laskemista. (Brett et al. 2011, s. 253—255)

4.6 Vertailu

Mikrotuotannossa energiantuotantoyksiköiltä vaaditaan pitkää ikää, pitkiä huoltovälejä, pientä melua, hyvää hyötysuhdetta ja pieniä päästöjä (Harrison & On 2011, s. 179). Puu-kaasua käytettäessä päästöt ovat pienet huolimatta käytetystä tuotantotekniikasta. Taulu-kossa 4 on vertailtu tuotantotekniikoiden ominaisuuksia.

Taulukko 4. Energiantuotantotekniikoiden ominaisuuksia (MTT Micro Turbine Technology; Thomas 2008; Larjola 2011; Brett et al. 2011; Harrison & On 2011; Sansaniwal et al. 2017)

Ominaisuus	Kaasu-moottori	Mikro-turbiini	Stirling-moottori	ORC	Poltto-kennot
Elinikä (h)	80 000	40 000-80 000	20 000	200 000	10 000-20 000
Huoltoväli (h)	4000	5000	8760	-	-
Äänenvoimakkuus (dB)	95-99	65-70	alle 40	40-55	40-55
Päästöt	pieni	hyvin pieni	pieni	pieni	lähes 0
Sähköntuotannon hyötysuhde (%)	27-30	16	11-15	10-20	38,5
Investointikustannukset (€/kW _e)	3000	10000	12000	1600-4500	7000
Tervan yläraja (mg/Nm ³)	100	50	-	-	1
Pienhiukkasten yläraja (mg/Nm ³)	50	30	-	-	-

Äänitasot ovat peräisin useista eri lähteistä, eikä mittauasetäisyyksistä ole tietoa. Investointikustannukset ovat alle 10 kW_e laitoksille ja ORC:lle ne ovat hyvin tapauskohtaisia. Mikroturbiinin investointikustannukset kysyttiin Eco Conceptin Arto Rautevaaralta.

Taulukosta huomataan, että kaasumoottorilla on paras hyötysuhde, se on edullisin ja se sietää huonompilaatuista kaasua. Muut tuotantotekniikat ovat vielä laajan kehityksen alla, mikä selittää korkean hinnan. Huonona puolena kaasumoottoreissa on meluhaitta, mutta sitä voidaan tarvittaessa vaimentaa.

5. HAJAUTETTU ENERGiantuotanto

Hajautetulle energiantuotannolle on olemassa useita eri määritelmiä. Usein sillä tarkoitetaan pienimuotoista sähkön- ja lämmönyhteistuotantoa. Tässä luvussa tarkastellaan hajautetun energiantuotannon muotoja, joita ovat aurinkoenergia, pientuulivoima, lämpöpumput ja bioenergia. Maat, joita tarkastellaan ovat Suomi ja Saksa.

5.1 Aurinkoenergia

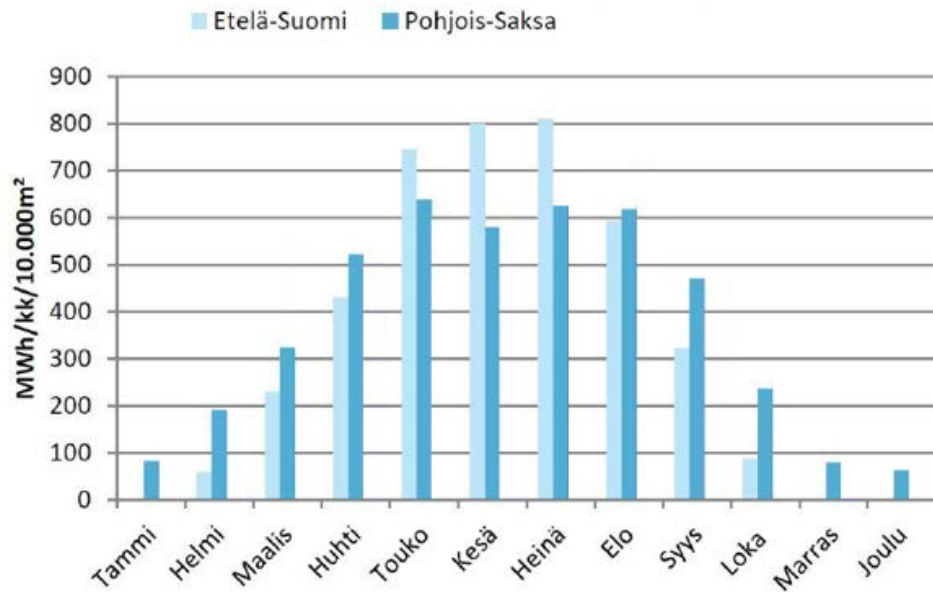
Aurinko on ehtymätön energialähde ja sen suuruus on huomattava. Mikäli maapallon pinnalle vuoden aikana tuleva energia saataisiin talteen, se riittäisi 6000 vuotta. Aurinko ei kuitenkaan aina paista ja sen määrä vaihtelee päivän, vuoden ja sijainnin mukaan. Aurinkoenergiaa hyödyntävät sovellukset voidaan jakaa aurinkosähkön- ja lämpöön. (Martinez et al. 2017, s. 277)

5.1.1 Aurinkolämpö

Aurinkokeräin on laite, joka muuntaa auringon säteilyenergian lämmöksi, joka siirtyy liikkuvaan nesteeseen, esimerkiksi veteen. Vesi kuljetetaan keräimeltä lämmitettävään tilaan tai lämminvesivaraajaan, jolloin lämmintä vettä voi hyödyntää tarpeen vaatiessa. (Kalogirou 2004, s. 240) Säteilyn määrästä noin 25—35 prosenttia on muunnettavissa lämmöksi (Vihanninjoki 2015, s. 7).

Suomessa aurinkolämpöä on hyödynnetty toistaiseksi melko vähän, vuonna 2010 arvioitu tuotanto oli alle 20 GWh. Suurin lämmön tarve on talvella, jolloin auringon säteily on vähäistä. Pohjoisessa Suomessa säteilyn teho ja intensiteetti on paljon heikompi kuin päiväntasaajalla, mikä heikentää keräimien kannattavuutta. (Vihanninjoki 2015, s. 7—8)

Saksassa on lähes vastaava tilanne kuin Suomessa, hyödyntäminen on ollut toistaiseksi vähäistä. Vuonna 2010 aurinkolämmön osuus uusiutuvien energialähteiden lämmöntuotannosta (9,5% koko lämmöntuotannosta) oli vain 4%. (Lauterbach et al. 2012, s. 5121) Kuvassa 14 on vertailu Etelä-Suomen ja Pohjois-Saksan aurinkolämmön tuotantoa hehtaarin kokoisella keräinalalla.



Kuva 14. Aurinkolämmön tuotanto kuukausittain hehtaarin kokoisella keräinalalla Etelä-Suomessa ja Pohjois-Saksassa (mukaillen Vihanninjoki 2015, s. 8)

Kuvasta huomataan, että Pohjois-Saksassa aurinkolämpöä saadaan talvella huomattavasti enemmän kuin Suomessa. Kesäaikaan saadun lämmön määrä on Suomessa korkeampi. Ero jää pieneksi, sillä Suomen vuosittainen aurinkolämmön saanto on vain 10% alhaisempi kuin Saksassa (Vihanninjoki 2015, s. 8).

5.1.2 Aurinkosähkö

Sähköä saadaan auringosta paneeleilla. Tarvitun jännite- ja tehotason mukaan niitä kytetään joko sarjan tai rinnan. Pientaloihin asennettavat järjestelmät ovat kooltaan 2–5 kW ja yrityksiin asennettavat 10–300 kW. (Vihanninjoki 2015, s. 10)

Suomessa sähköä saadaan vuodessa 1000 kWh yhtä asennettua kilowattia kohden. Pienasennuksista ei ole toistaiseksi saatavilla tilastotietoa. Kesämökkijärjestelmiä arvioidaan olevan noin 40 000 ja pientalojärjestelmiä muutamia satoja. (Vihanninjoki 2015, s. 11)

Saksassa aurinkosähköä hyödynnetään huomattavasti enemmän. Asennuksien määrä vuoden 2007 lopussa oli noin 430 000, joiden kokonaiskapasiteetti oli 3,8 GW. Yhden järjestelmän keskimääräinen teho oli 8,8 kW. Vuonna 2012 otettiin käyttöön 190 000 uutta järjestelmää, joista puolet asennettiin maatiloille tai koteihin. Huhtikuun 13. päivänä vuonna 2013 pientalo- ja maatilajärjestelmät tuottivat noin 10% Saksan sähköntarpeesta. (Burger & Weinmann 2014, s. 55)

5.2 Pientuulivoima

Pientuulivoimaksi kutsutaan tuulivoimaloita, joiden potkurin pinta-ala on pienempi kuin 200 m². Tällöin nimellisteho on alle 50 kW. Pientuulivoima voidaan jakaa neljän kategoriaan: mökkituotanto ja akkujen lataaminen (alle 1 kW), liikerakennukset ja asunnot (alle 5 kW), suuret yritykset ja maatalous (5-50 kW) ja telekommunikaatio (alle 5 kW). (Vihanninjoki 2015, s. 12)

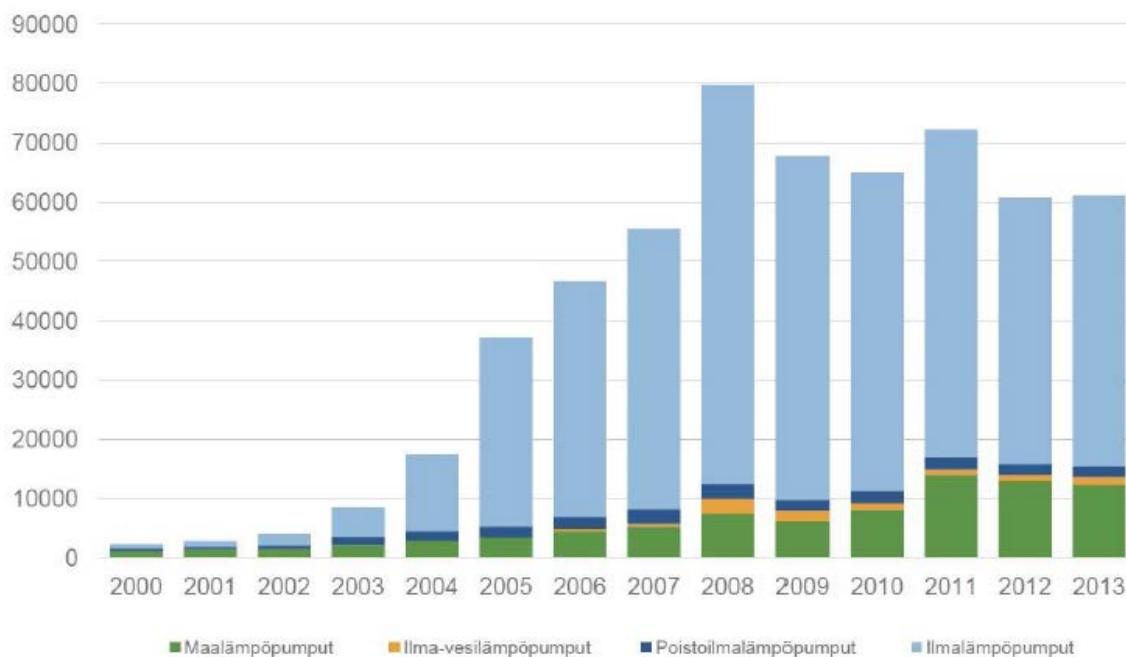
Pientuulivoiman käyttöä voidaan arvioida toimitettujen laitteiden perusteella. Mökkijärjestelmiä toimitetaan noin 100—200 laitetta vuodessa. Liikerakennuksiin, asuntoihin ja telekommunikaation käyttöön toimitetaan kuhunkin noin kymmenen laitetta vuosittain. 5—50 kW:n järjestelmiä asennetaan vain muutamia. Toimitusmäärien perusteella pientuulivoiman hyödyntäminen on vähäistä ja mökkijärjestelmien osuus on yli 90% kokonaismäärästä. (Vihanninjoki 2015, s. 12)

Saksan pientuulivoimamarkkinat ovat pienet, mutta kasvavat vakaasti. Saksan liittovaltion pienten tuuliturbiinien yhdistys (BVKW) ennustaa pientuulivoiman määrän kasvavan 700 000 yksiköllä vuoteen 2020 mennessä. Saksassa on tehty tutkimusta pientuulivoiman käytön mahdollisuuksista kaupungeissa. (Grieser et al. 2015)

5.3 Lämpöpumput

Lämpöpumppu ottaa lämpöä edullisesta lämmönlähteestä esimerkiksi maasta, kalliosta tai vedestä ja luovuttaa sen korkeammassa lämpötilassa lämmitettävään kohteeseen. Tämä on mahdollista käyttämällä arvokkaampaa energiaa, kuten sähköä tai noin 50 astetta lämmönluovutustilaa kuumempaa vettä. Pumppu hyödyntää arvokkaamman energialähteen potentiaalin tehdä työtä. (Vihanninjoki 2015, s. 12)

Lämpöpumppu tarvitsee kuitenkin sähköä toimiakseen, mikä vaikuttaa pumpun kokonaishyötysuhteeseen. Lämpöpumppujen hyötysuhteena käytetään lämpökerrointa (COP), joka kuvaa kuinka tehokkaasti sähköenergia saadaan muutettua lämpöenergiaksi. Lämmönlähteen ja lämmitettävän kohteen välillä vallitseva lämpötilaero on suurin hyötysuhteeseen vaikuttava tekijä. Pumppujen ohella käytetään usein muuta lämmitystä, esimerkiksi sähkövastuksia, öljykattilaa tai tulisijaa. Kuvassa 15 on esitetty käyttöön otettujen lämpöpumppujen määrä Suomessa vuosittain. (Vihanninjoki 2015, s. 13)



Kuva 15. Käyttöön otettujen lämpöpumppujen määrä Suomessa vuosina 2000-2013 (Vihanninjoki 2015, s. 14).

Saksassa lämpöpumppuja käytetään vähemmän kuin Suomessa, mikä johtuu pienemmästä lämmitystarpeesta. Vuonna 2015 Saksassa lämpöpumppuja myytiin 57 000 kappaletta, joka vähemmän kuin Suomessa, vaikka Suomen asukasluku on paljon pienempi. Myynti oli laskenut aikaisemmista vuosista ja syynä oli alhainen öljyn hinta. (EHPA 2016)

5.4 Bioenergia

Bioenergialla tarkoitetaan biopolttoaineista peräisin olevaa energiaa, ja biopolttoaine on eloperäinen, kasvimassasta jalostettu polttoaine, joka on muodoltaan kiinteää, nestettä tai kaasua. Kiinteisiin biopolttoaineisiin kuuluvat esimerkiksi halot, rangat, pilkkeet, hakkeet, murskeet, kuoret, sahanpurut ja lastut. Bioetanoli, biodiesel ja biopolttoöljy ovat nestemäisiä biopolttoaineita. Puukaasu ja mädättämällä tuotettu biokaasu ovat kaasumaisia biopolttoaineita. (Vihanninjoki 2015, s. 16—17)

Suomessa on paljon metsää, minkä takia erityisesti metsäperäinen bioenergia on Suomessa erittäin keskeisessä asemassa. Puun pienpoltto on merkittävä osa hajautettua energiantuotantoa Suomessa. Vuonna 2013 pienpoltto muodosti noin 14% Suomen uusiutuvien energialähteiden käytöstä. Biokaasun mikrotuotanto maataloilla on toistaiseksi ollut vähäistä, vuonna 2013 0,63% koko Suomen biokaasun tuotannosta. Maataloilta peräisin olleesta biokaasusta hyödynnettiin 99%, mikä on paljon enemmän verrattuna koko maan biokaasun hyödyntämistasteeseen 81%. (Vihanninjoki 2015, s. 17—18)

Saksassa on maaseudulla bioenergiakylä, joissa kyläläiset omistavat laitokset yhdessä ja huolehtivat niiden toiminnasta. Kylien määrä on kasvanut huomattavasti. Vuonna 2001 perustettiin ensimmäinen bioenergiakylä ja vuonna 2012 niitä oli 133. Yleensä laitokset ovat CHP-laitoksia ja niissä käytetään paikallisia polttoaineita. Useat Saksan osavaltiot tukevat laitoksien rakentamista rahallisesti ja alkuinvestointeja täydennetään suorilla tuilla. (Burger & Weinmann 2014)

6. TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT

Hajautetun energiantuotannon määrä kasvaa tasaisesti. Suomessa erityisesti bioenergiaa ja aurinkoenergiaa kohtaan kiinnostus on kasvanut. Aurinkopaneelien hinta on laskenut ja aurinkosähkölaitteiden toimitukset huomattavassa kasvussa. Määrien ennustaminen on hankalaa, sillä pienen kokoluokan sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksien asennetusta kapasiteetista ja vuosituotannosta ei tehdä tilastointeja Suomessa. (Vihanninjoki 2015) Taulukossa 5 on esitelty hajautetun sähköntuotannon potentiaaliset lisäykset joidenkin teknologioiden osalta vuoteen 2020 mennessä.

Taulukko 5. *Hajautetun sähköntuotannon potentiaaliset lisäykset joidenkin teknologioiden osalta vuoteen 2020 mennessä (Vihanninjoki 2015, s. 28)*

	Aurinkosäh- kö	Pien- tuulivoima	Kaasumoot- torit	Poltto- kennot	Yhteensä
Sähkäteho (MW)	500	6	54	25	585
Sähkön vuosituotanto (GWh)	450	8,1	324	150	932,1
Sähköntuotannon hyötysuhde (%)			35	40	
Lämmöntuotannon hyötysuhde (%)			45	40	
Huipunkäyttöaika (h)	1000	1350	6000	6000	
Yksiköiden lukumäärä	100000	1200	1200	500	
Yksikön sähkäteho (kW)	5	5	45	50	
Kokonaisinvestointi (milj. EUR)	800	27	320	250	1397

Taulukko on hyvin karkea arvio. Se ei anna realistista kuvaa asennetuista teknisistä ratkaisuista. Sen sijaan sen tarkoituksena on osoittaa, kuinka suuria investoinnit voisivat olla ja millaisia taloudellisia vaikutuksia investoinneilla saattaisi olla.

Puun pienpoltosta syntyy pienhiukkaspäästöjä, joten puun pienpolttoa saatetaan rajoittaa tulevaisuudessa, etenkin taajama-alueilla. Tällöin ratkaisu voisi olla puun kaasutus, jolloin pienhiukkasia syntyisi huomattavasti vähemmän. Lisäksi puun käyttö muuttuisi energiatehokkaammaksi. Toisaalta investointi kaasutusjärjestelmään voisi olla huomattavasti suurempi kuin tulisijaan tai uuniin, jossa palamista säädeltäisiin tarkemmin ja siten päästöt jäisivät pienemmäksi. Mikäli tulevaisuudessa mikrokokoluokan kaasutusjärjestelmien tuotantoon tulee enemmän kilpailua, hinnat voisivat asettua tasolle, jolloin investointi olisi kannattava. Kaasutusjärjestelmien tulisi olla mahdollisimman huoltovapaita ja automatisoituja, jotta ne olisivat kilpailukykyisiä tulisijojen kanssa. Huomioon on otettava myös turvallisuus; järjestelmän kaasuvuotoihin tulisi varautua ja ehkäistä hiilimonoksidin vuoto huoneilmaan järjestelmän rikkoontuessa.

7. YHTEENVETO

Puukaasua syntyy puun termokemiallisessa hajoamisessa, korkeassa lämpötilassa ja vähähappisissa olosuhteissa. Puun kaasutusprosessi on pääosin endoterminen, eksotermisten palamisreaktioiden määrä pyritään minimoimaan kaasun energiasisällön kasvattamiseksi. Puukaasu koostuu pääosin hiilimonoksidista ja vedystä. Muita komponentteja puukaasussa ovat metaani, vesihöyry ja hiilidioksidi.

Parhaiten mikrotuotantoon soveltuva kaasutustekniikka on myötävirtakaasutin. Se ei vaadi niin hyvälaatuista polttoainetta kuin kaksoiskaasutin ja kaasun poistumislämpötila on pienempi. Toisaalta kaksoiskaasuttimen tuottamassa kaasussa on pienempi tervapitoisuus, mutta sen hyötysuhde on pienempi kuin myötävirtakaasuttimessa. Suurin osa kaupallisista kaasuttimista on myötävirtakaasuttimia.

Puukaasussa on aina epäpuhtauksia, jotka on poistettava ennen sähköntuotantoyksikköä. Pahin epäpuhtauksista ja kaasutuksen suurin ongelma on terva, joka aiheuttaa puhdistusyksiköiden tukkeutumista, metallien korroosiota ja ongelmia sähköntuotantoyksiköissä. Muita epäpuhtauksia ovat pienhiukkaset, alkalimetallit ja rikin- ja kloorinyhdisteet. Nämä aiheuttavat metallien korroosiota ja ympäristön saastumista. Lisäksi pienhiukkaset voivat kasaantua kaasuttimeen. Epäpuhtauksia voidaan poistaa primäärisillä ja sekundäärisillä puhdistusmenetelmillä. Primääriset menetelmät liittyvät kaasuttimen suunnitteluun ja kaasutusolosuhteisiin. Sekundääriset menetelmät ovat kaasutuksen jälkeisiä puhdistusmenetelmiä.

Puukaasusta tuotetaan usein sähköä ja lämpöä. Kaasumoottori on mikrotuotantoon soveltuvimpuu-kaasukäyttöinen energiantuotantomuoto. Se on edullisin, tekniikka on pitkään tunnettu ja varmatoiminen ja se sietää parhaiten epäpuhtauksia. Huonoina puolina siinä on meluhaitta ja tihein huoltoväli. Tulevaisuudessa paras energiantuotanto muoto puukaasulle voi olla mikroturbiini tai polttokenno.

Hajautettu energiantuotanto on pienimuotoista sähkön ja lämmön yhteistuotantoa. Hajautetun energiantuotannon muotoja ovat aurinkoenergia, pientuulivoima, lämpöpumput ja bioenergia. Tällä hetkellä Suomessa eniten on panostettu bioenergiaan ja lämpöpumppeihin. Saksassa on panostettu pääosin aurinkoenergiaan. Suomessa suuri osa bioenergian käytöstä tulee puun pienpoltosta. Lainsäädäntö puun pienpolton suhteen voi muuttua tulevaisuudessa päästöjen vuoksi, jolloin puun kaasutus voisi kasvattaa suosiotaan. Toistaiseksi puun kaasutuksen hyödyntäminen kohdistuu lähinnä maataloihin, muissa tapauksissa se on harvinaista.

LÄHTEET

Adhikari, S., Abdoulmoumine, N., Nam, H. & Oyedeki, O. (2017). 16 - Biomass gasification producer gas cleanup, in: Dalena, F., Basile, A. & Rossi, C. (ed.), *Bioenergy Systems for the Future*, Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 541-557.

Algieri, A. & Morrone, P. (2014). Energetic analysis of biomass-fired ORC systems for micro-scale combined heat and power (CHP) generation. A possible application to the Italian residential sector, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 71(2), pp. 751-759.

Anis, S. & Zainal, Z.A. (2011). Tar reduction in biomass producer gas via mechanical, catalytic and thermal methods: A review, *RENEWABLE & SUSTAINABLE ENERGY REVIEWS*, Vol. 15(5), pp. 2355-2377.

Backman, J.L.H. & Kaikko, J. (2011). 7 - Microturbine systems for small combined heat and power (CHP) applications, in: Beith, R. (ed.), *Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Systems*, Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 147-178.

Basu, P. (2013). *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction*, 2nd ed. Elsevier Science & Technology, San Diego, 551 p.

Brett, D.J.L., Brandon, N.P., Hawkes, A.D. & Staffell, I. (2011). 10 - Fuel cell systems for small and micro combined heat and power (CHP) applications, in: Beith, R. (ed.), *Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Systems*, Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 233-261.

Burger, C. & Weinmann, J. (2014). Germany's Decentralized Energy Revolution, in: Si-shansi, F.P. (ed.), *Distributed Generation and its Implications for the Utility Industry*, Academic Press, Boston, pp. 49-73.

Dagnall, S., Hill, J. & Pegg, D. (2000). Resource mapping and analysis of farm livestock manures—assessing the opportunities for biomass-to-energy schemes, *Biore-source Technology*, Vol. 71(3), pp. 225-234.

EHPA Heat pump sales in Germany - 2015, EHPA. Saatavissa (viitattu 15.8.2018): <http://www.ehpa.org/about/news/article/heat-pump-sales-in-germany-2015/>.

Grieser, B., Sunak, Y. & Madlener, R. (2015). Economics of small wind turbines in urban settings: An empirical investigation for Germany, *Renewable Energy*, Vol. 78 pp. 334-350.

Harrison, J. & On, E. (2011). 8 - Stirling engine systems for small and micro combined heat and power (CHP) applications, in: Beith, R. (ed.), *Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Systems*, Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 179-205.

- Hiltunen, I. (2013). Kaupalliset pienen kokoluokan kaasutus CHP laitokset, VTT. Saatavissa (viitattu 18.6.2018): https://www.vtt.fi/Documents/07_Kaupalliset_CHP_laitokset.pdf.
- Hornung, A. (2014). Transformation of Biomass : Theory to Practice, John Wiley & Sons, Incorporated, New York, 371 p.
- Kalogirou, S.A. (2004). Solar thermal collectors and applications, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 30(3), pp. 231-295.
- Larjola, J. (2011). 9 - Organic Rankine cycle (ORC) based waste heat/waste fuel recovery systems for small combined heat and power (CHP) applications, in: Beith, R. (ed.), Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Systems, Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 206-232.
- Lauterbach, C., Schmitt, B., Jordan, U. & Vajen, K. (2012). The potential of solar heat for industrial processes in Germany, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16(7), pp. 5121-5130.
- Le Coq, L. & Ashenafi, D. (2012). Syngas Treatment Unit for Small Scale Gasification - Application to IC Engine Gas Quality Requirement, Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 5(1), pp. 95-103.
- Martinez, S., Michaux, G., Salagnac, P. & Bouvier, J. (2017). Micro-combined heat and power systems (micro-CHP) based on renewable energy sources, Energy Conversion and Management, Vol. 154 pp. 262-285.
- Mikalsen, R. (2011). 6 - Internal combustion and reciprocating engine systems for small and micro combined heat and power (CHP) applications, in: Beith, R. (ed.), Small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Systems, Woodhead Publishing, Cambridge, pp. 125-146.
- MTT Micro Turbine Technology Specifications EnerTwin, MTT Micro Turbine Technology. Saatavissa (viitattu 12.7.2018): https://www.enertwin.com/cms/EN_Specifications_EnerTwin-2017.pdf.
- Neves, D., Thunman, H., Matos, A., Tarelho, L. & Gómez-Barea, A. (2011). Characterization and prediction of biomass pyrolysis products, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 37(5), pp. 611-630.
- Sansaniwal, S.K., Pal, K., Rosen, M.A. & Tyagi, S.K. (2017). Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 72 pp. 363-384.
- Thomas, B. (2008). Benchmark testing of Micro-CHP units, Applied Thermal Engineering, Vol. 28(16), pp. 2049-2054.
- Valderrama Rios, M.L., González, A.M., Lora, E.E.S. & Almazán del Olmo, Oscar Agustin (2018). Reduction of tar generated during biomass gasification: A review, Biomass and Bioenergy, Vol. 108 pp. 345-370.

Vihanninjoki, V. (2015). Hajautettu energiantuotanto Suomessa, Suomen ympäristökeskus SYKE. Saatavissa (viitattu 4.8.2018): <http://www.syke.fi/download/name/%7BDD119785-B537-45DE-AEF0-8360DCAB1BDF%7D/111845>.

Wang, L., Weller, C.L., Jones, D.D. & Hanna, M.A. (2008). Contemporary issues in thermal gasification of biomass and its application to electricity and fuel production, Biomass and Bioenergy, Vol. 32(7), pp. 573-581.